

論文 かぶり厚が小さい異形鉄筋の付着性状に関する実験的研究

飯塚 敬一*¹・檜貝 勇*²・斉藤 成彦*³・高橋 良輔*⁴

要旨: コンクリート構造物の変形挙動において、鉄筋とコンクリートの付着の影響は極めて大きいことが認識されている。FEM 解析で付着性状を取扱うには、付着応力とすべりとの関係を用いるのが便利であり、この関係については、これまでも多くの提案がなされている。しかし、かぶり厚が小さい鉄筋の付着性状に関する研究は限られているため、著者らは、両引き試験に基づいて、かぶり厚が鉄筋の付着性状に及ぼす影響をコンクリート強度や鉄筋径の影響と併せて検討した。さらに、ひずみの影響を取り入れて、ポストピークまでの付着応力-すべり-ひずみ関係の検討を行った。

キーワード: 付着応力-すべり関係、かぶり厚、圧縮強度、ひずみ関数

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC と称す）構造物の FEM 解析において、鉄筋とコンクリートは完全付着として取扱うのが一般的であった。しかし、鉄筋とコンクリートの付着性状が RC 構造物の全体挙動に大きく影響を及ぼす場合があり、付着の重要性が認識されてきている。FEM 解析において付着を取扱うには、付着応力-すべり関係（以下、 τ - S 関係と称す）を用いるのが便利であり、マッシュなコンクリートに埋め込まれた鉄筋の τ - S 関係は、島ら¹⁾によって定式化されている。しかし、曲げ部材のようなかぶり厚が小さい鉄筋の τ - S 関係は、十分なかぶり厚を有する鉄筋の τ - S 関係とは異なっていることが松本ら²⁾によって報告されている。そこで、本研究では、曲げ部材の引張側の付着メカニズムを模擬できるように、かぶり厚が小さい RC 一軸引張部材の両引き試験を行い、ポストピーク領域も含めた τ - S 関係を実験結果に基づいて検討した。このとき、かぶり厚と併せてコンクリート強度や鉄筋径を実験要因とした。また、これらの要因の他にも、 τ - S 関係は定着長や境界条件、あるいは載荷方法による応力場の違いの影響を受けることが山尾ら³⁾や壺岐ら⁴⁾によって指摘されていることから、本研究では、様々な要因によって変化する付着性状に一般性を持たせるため、島らの研究を参考とし、 τ - S 関係に鉄筋ひずみ ε の影響を取り入れて、 τ - S - ε 関係の検討を試みた。

2. 実験概要

実験は、コンクリート強度が τ - S 関係に及ぼす影響を検討するシリーズ 1 と、鉄筋のかぶり厚が同性状に及ぼす影響を検討するシリーズ 2⁵⁾ を実施した。シリーズ 1

では、鉄筋径とかぶり厚を固定し、コンクリート圧縮強度をパラメータとした。シリーズ 2 では、コンクリート強度を一定とし、鉄筋径とかぶり厚を変化させた。

2.1 使用材料

表-1 にコンクリートの配合、ならびに試験時のコンクリート強度を示す。コンクリートには、早強ポルトランドセメントを使用し、粗骨材には最大寸法 20mm の砕石を用いた。目標圧縮強度は、シリーズ 1 では 7 日強度で 10 N/mm², 20 N/mm², 24 N/mm², 30 N/mm², 40 N/mm², 48 N/mm², 60 N/mm² の 7 ケース、シリーズ 2 では一律 25 N/mm² とし、付着供試体、テストピースは共に湿布養生を行った。スランブは、付着試験におけるブリーディングの影響を極力避けるために 5cm と小さくした。

降伏点が 300~500 N/mm² 程度の通常の鉄筋を用いると、付着強度に達する前に鉄筋が降伏してしまい、 τ - S 関係のポストピーク挙動を把握することができない。そこで、鉄筋には降伏応力の高い異形 PC 鋼棒 D25, D32 を用いた。使用した異形 PC 鋼棒は、日本工業規格 (JIS 規格) に適合するものであり、その形状と力学的性質を図-1 および表-2 に示した。これら異形 PC 鋼棒は比例限度が 700 N/mm² 程度であり、それ以降の応力-ひずみ関係が曲線となるため、実験に先立ち鉄筋の予備載荷を行い、比例限度を 850 N/mm² まで高めて用いた。

2.2 供試体

本研究では、かぶり厚 C が付着性状に及ぼす影響を検討するため、図-2 に示すような一面のかぶりを小さくした供試体を用いて両引き試験を行った。かぶり厚 C は、シリーズ 1 では一律 30mm とし、シリーズ 2 では 10mm, 30mm, 50mm と変化させたほかに、D25 では C/D (D は鉄筋呼び径) が 1 となるケース、D32 では C/D が 2 とな

*1 東電設計 (株) 土木本部耐震技術部 (正会員)
 *2 山梨大学大学院 医学工学総合研究部教授 工博 (正会員)
 *3 山梨大学大学院 医学工学総合研究部准教授 博 (工) (正会員)
 *4 山梨大学大学院 医学工学総合研究部助教 博 (工) (正会員)

表-1 供試体の諸元および材料試験結果

シリーズ	鉄筋径 D[mm]	かぶり厚 C[mm]	C/D	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)					圧縮強度 f ['] c[N/mm ²]	スランプ [cm]	供試体数
						W	C	S	G	減水剤			
1 圧縮強度の 影響検討	25	30	1.8	93	52	185	199	1004	945	0.40	11.2	2.5	4
				81	50	182	225	958	976	0.45	16.3	3.3	4
				70	48	176	251	917	1013	0.50	28.0	4.8	6
				61	47	179	293	878	1009	0.59	32.7	6.2	6
				54	47	176	326	869	998	0.65	41.3	4.5	5
				49	46	176	359	837	1002	0.72	46.8	5.5	6
				42	45	182	433	785	977	0.87	55.8	5.2	5
2 かぶり厚の 影響検討 ⁵⁾	25	10	0.4	71	48	170	258	896	985	0.48	25.1	6.2	4
		25	1.0								27.0	3.8	3
		30	1.8								25.1	5.8	3
		50	2.0								25.1	5.4	3
	32	10	0.3								20.1	5.1	3
		30	0.9								21.2	4.0	3
		50	1.6								29.1	6.1	4
		64	2.0								27.0	3.8	3

表-2 鉄筋の形状と力学的性質

呼び名	公称断面積 [mm ²]	外形			ピッチ P[mm]	ふし高さ a[mm]	ふし底幅 b[mm]	ふし高幅 c[mm]	弾性係数 [N/mm ²]	降伏応力 [N/mm ²]
		D1 [mm]	D2 [mm]	D3 [mm]						
D25	506.7	28.4	24.4	23.6	13	2.0	6.4	2.4	1.89×10 ⁵	1013
D32	794.2	35.2	30.4	29.4	16	2.4	8.1	3.3	1.83×10 ⁵	994

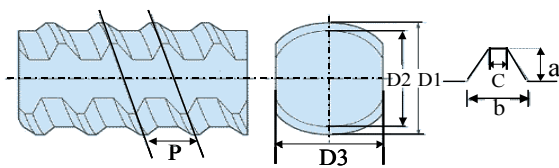


図-1 鉄筋の形状

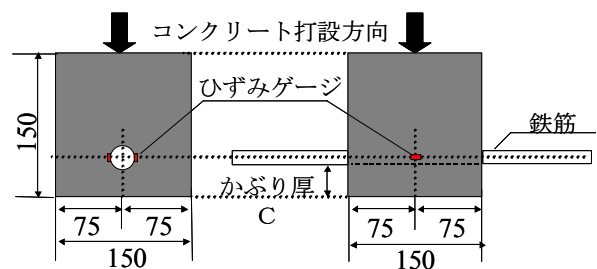


図-2 供試体概要

るケースも設定した。コンクリート断面は 150×150mm とし、長さは供試体の中間に横び割れが発生しないように 150mm と短くした (5D~6D)。このような条件とすることで、本実験では、RC 部材の曲げ引張側において曲げひび割れが十分に発達して定常状態に達した時の付着性状を評価することができる。

コンクリートは最小かぶり面が打ち込み底面になるように、鉄筋を水平にして打設した。また、鉄筋は縦リブが水平になる向きに配置した。

付着応力を求めるために、供試体中央断面で鉄筋のひずみを測定した。ひずみゲージは 1mm ゲージを使用し、付着を乱さないように、ふしを削らずに、鉄筋の縦リブ部分の表裏 2 箇所 に貼付した。また、水分と衝撃からの保護のために、エポキシ樹脂とワックスを薄く塗布した。

鉄筋のすべり量は、図-3 に示すように上下荷端の鉄筋部分に、フルスケール 5mm の変位計を 2 個取付けた支持枠をネジで固定して測定した。

2.3 荷重方法

図-3 に荷重方法を示す。1000kN 万能試験機を用い、

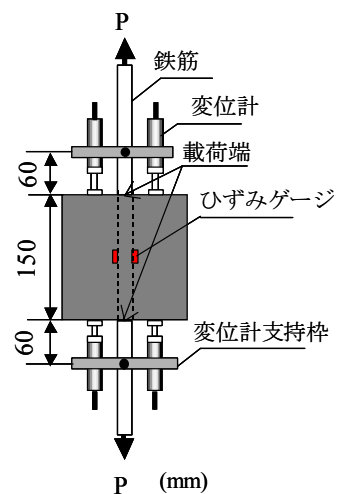


図-3 両引き試験荷重状況

鉄筋の両端に軸引張力を加える両引き試験を行った。荷重方法は単調荷重とし、最大荷重は鉄筋弾性域の 410kN までとした。荷重速度はおよそ 100N/min である。

3. 実験結果

3.1 付着応力・すべり量の算定方法

本実験における付着応力 τ とは、載荷端から 75mm (2.5D~3D) の区間における平均付着応力であり、次式による。

$$\tau = A_s(\sigma_{s1} - \sigma_{s2})/ul \quad (1)$$

ここで、 A_s : 鉄筋の公称断面積 (mm²)

u : 鉄筋の公称周長 (mm)

σ_{s1} : 載荷端での鉄筋応力 (N/mm²)

σ_{s2} : 供試体中央での鉄筋応力 (N/mm²)

l : 片側付着長さ (75mm)

すべり量 S は、載荷端から支持枠固定位置までの変位増分から鉄筋の伸びを補正して算定した。すべり量は上下の変位計でそれぞれ計測しており、供試体 1 体について τ - S 関係は 2 つ求まる。供試体は各ケースに対して 6 体ずつ製作し、このうち計測が不完全であったものは除き、値にばらつきの少ない妥当と思われるデータを採用した。採用供試体数は先に表-1 に示したとおりである。

3.2 コンクリート強度が付着性状に及ぼす影響

コンクリート強度が τ - S 関係に及ぼす影響をシリーズ 1 の実験結果に基づいて検討した。

コンクリート強度の影響について、ACI⁶⁾ では、最大付着応力 τ_{max} が、コンクリート強度 f'_c の 1/2 乗に比例することを示している。一方、山尾ら³⁾ は、マッシュなコンクリートの引抜き試験の結果から、定着長が十分に長い場合の τ_{max} が、コンクリート強度 f'_c の 2/3 乗に比例することを示している。さらにこの結果について島ら¹⁾ は、コンクリート強度の影響は見かけ上 f'_c の $2/3$ として現れるが、これは鉄筋ひずみの影響を含有したものであるため、付着応力に及ぼすコンクリート強度の影響は f'_c よりも大きくなり、結果的に f'_c に比例することを定着長が 2D と短い引抜き試験の結果により示している。

今回のシリーズ 1 の実験より得られた τ - S 関係を図-4 に示す。シリーズ 1 の実験は、かぶり厚を 30mm と小さくした両引き試験であり、コンクリート強度 f'_c を 11.2N/mm²~55.8N/mm² の範囲で 7 段階に変化させることによって、コンクリート強度が τ - S 関係に及ぼす影響を評価するものである。図-4 の各曲線は 4~6 供試体についての平均値であり、例として、 f'_c が 11.2 N/mm², 32.7 N/mm², 55.8 N/mm² のケースの各供試体データと平均値を図-5 に示した。図-4 では、 f'_c の増加とともに τ_{max} も増加する傾向が見られる。そこで、各供試体の f'_c と τ_{max} の関係を図-6 のようにプロットすると、 τ_{max} が f'_c に比例するとした場合には、両者の関係は式(2)のような直線で近似される。また、いくつかの関数形を用いて検討した結果、 τ_{max} が f'_c の 1/2 乗に比例している傾向

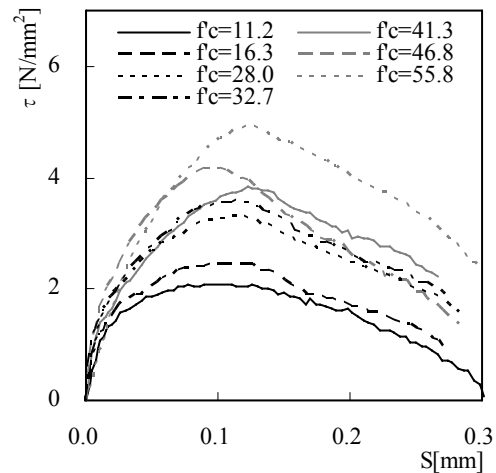


図-4 コンクリート強度が異なるときの τ - S 関係

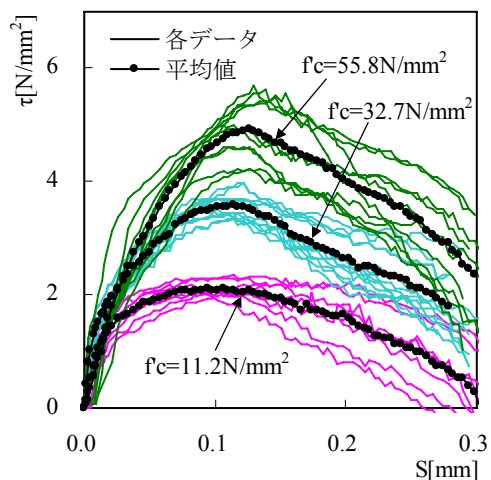


図-5 τ - S 関係(各供試体データと平均値)

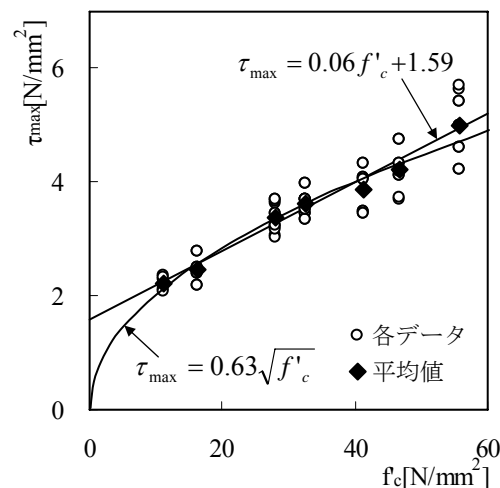


図-6 最大付着応力 τ_{max} と圧縮強度 f'_c の関係

が認められ、 τ_{max} は式(3)のような曲線で近似される。これは、島らの見解と比較して、 f'_c が τ_{max} に及ぼす影響の度合いが異なるものである。このような相違が生じる要因の一つとしては、引抜き試験と両引き試験のコンクリートの応力場が異なることも考えられるが、島らの実験データ数は必ずしも十分なものではないので、 τ_{max} の変

動に起因した結果が得られた可能性がある。また、多くの設計コードにおいても τ_{\max} を f'_c の 1/2 乗に比例していることを考え併せると、今回の結果は妥当であるように思われる。

$$\tau_{\max} = 0.06f'_c + 1.59 \quad (2)$$

$$\tau_{\max} = 0.63\sqrt{f'_c} \quad (3)$$

ここで、 τ_{\max} : 最大付着応力[N/mm²]

f'_c : コンクリート強度[N/mm²]

ここで提案した二つの近似式はいずれも実験値とよく一致しているが、直線近似した場合には、コンクリート強度が 0 の場合にも付着強度が存在することになる。したがって、曲線で近似した式(3)が適当であるとして以下の検討を行うものとした。

コンクリート強度の違いにより、 τ - S 関係の曲線の形に差が生じるのか検討するために、 τ_{\max} (最大付着応力) で正規化した付着応力と S_{\max} (最大付着応力時のすべり量) で正規化したすべり量の関係を図-7 に示す。同図より、 S/S_{\max} が 0~1 の区間ではコンクリート強度が小さいケースの τ/τ_{\max} が高く、コンクリート強度が大きいケースでは低くなる傾向が見られるが、各曲線が大きくばらつくことはなく、コンクリート強度は τ - S 関係の曲線の形状に大きな影響を及ぼさないことを確認した。

3.3 かぶり厚が付着性状に及ぼす影響

シリーズ 2 の実験は、鉄筋径とかぶり厚を変化させたときの付着性状を評価することを目的としたものであり、その τ - S 関係に関する検討は、寄特ら⁵⁾ によって報告されている。ここでは上記 3.2 の結果を踏まえて、 f'_c の 1/2 乗で正規化した τ - S 関係を図-8、図-9 に示す。図-8 は D25 の鉄筋に対してかぶり厚 C を 10mm~50mm まで変化させたものであり、図-9 は D32 の鉄筋に対して C を 10mm~64mm (2D) まで変化させたものである。両図には、 τ_{\max} に達した点を丸印で示している。いずれ

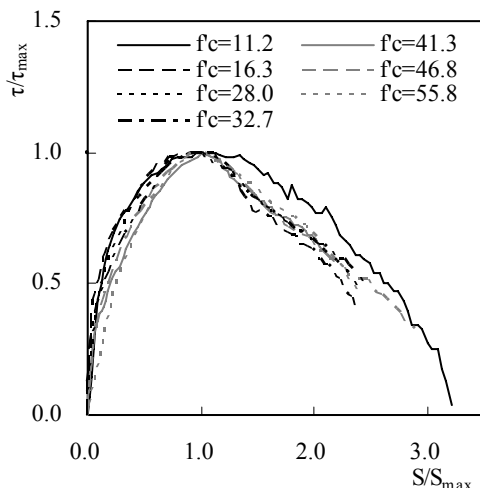


図-7 τ/τ_{\max} - S/S_{\max} 関係

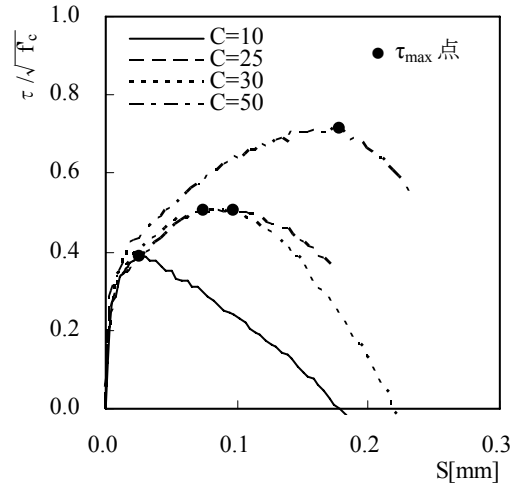


図-8 かぶり厚が異なるときの τ - S 関係 (鉄筋 D25)

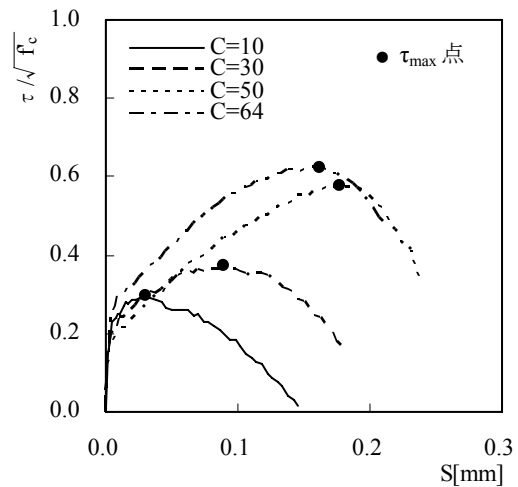


図-9 かぶり厚が異なるときの τ - S 関係 (鉄筋 D32)

の鉄筋径の場合も、かぶり厚が大きくなるにしたがって、最大付着応力、および最大付着応力時のすべり量が大きくなる傾向にある。

3.4 付着応力-すべり-ひずみ関係の検討

島ら¹⁾は、いかなる境界条件でも成り立つ τ - S 関係を定式化するために鉄筋ひずみ ϵ の影響を取り入れ、付着応力を式(4)のように表している。式中 τ_0 は鉄筋のひずみが 0 であるときの(仮想の)付着応力であり、式(5)で表される。鉄筋ひずみの影響を表す関数 $g(\epsilon)$ は、式(6)のような簡単な形で表される。結果的に式(4)、式(5)、式(6)より、 τ - S - ϵ 関係は式(7)となる。したがって、島式における鉄筋ひずみの影響は式(8)のようにも表すことができる。

$$\tau = \tau_0(s) \cdot g(\epsilon) \quad (4)$$

$$\tau_0(s) = 0.73f'_c (\ln(1+5s))^3 \quad (5)$$

$$g(\epsilon) = \frac{1}{(1+\epsilon \times 10^5)} \quad (6)$$

$$\tau = \frac{0.73f'_c (\ln(1+5s))^3}{(1+\epsilon \times 10^5)} \quad (7)$$

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{g(\varepsilon)} = 0.73 \frac{f'_c}{\tau} (\ln(1+5s))^3 \quad (8)$$

ここで、 τ : 付着応力[N/mm²]

τ_0 : ひずみが0のときの付着応力[N/mm²]

$s = 1000S/D$

f'_c : コンクリート強度[N/mm²]

S : すべり量[mm]

D : 鉄筋径[mm]

ε : 鉄筋ひずみ

一方、今回のシリーズ1の実験より得られた式(3)に基づいて、付着応力が f'_c の平方根に比例すると仮定すれば、ひずみの影響は式(9)のように表すことができる。そこで、シリーズ2の実験結果を対象として、島らの式(8)と今回の実験結果に基づいた式(9)を適用し、鉄筋のかぶり厚がひずみの関数に及ぼす影響について検討を行った。

$$f(\varepsilon) = \sqrt{f'_c} \frac{1}{\tau} (\ln(1+5s))^3 \quad (9)$$

シリーズ2の実験より得られた鉄筋ひずみデータを基に、式(8)のひずみの関数を用いて求めた $f(\varepsilon)$ と鉄筋ひずみ ε との関係(以下、 $f(\varepsilon)$ - ε 関係と称す)を鉄筋径ごと

に図-10、図-11に示す。同様に、式(9)のひずみの関数を用いて求めた $f(\varepsilon)$ - ε 関係を鉄筋径ごとに図-12、図-13に示す。図の各曲線は3~4供試体についての平均値であり、 τ_{\max} に対応する点には丸印でマーキングをした。また、図-10、図-11には島らの提案する式(10)の $f(\varepsilon)$ 直線も併せて示した。

$$f(\varepsilon) = 1/g(\varepsilon) = 1 + \varepsilon \times 10^5 \quad (10)$$

かぶり厚が $f(\varepsilon)$ - ε 関係に与える影響に着目すると、ひずみ量が同じであれば、かぶり厚が小さいケースの $f(\varepsilon)$ の値が大きくなる傾向にあり、図-10、図-11のように、ピーク以降の軟化域では、式(10)の直線から大きく乖離している。また、かぶり厚が大きくなると $f(\varepsilon)$ - ε 関係全体の勾配は緩やかとなり、かぶり厚が2D程度では式(10)の直線に近づく。しかし、この場合も、ピーク以降には $f(\varepsilon)$ の値が式(10)の直線を上回る傾向を示している。このように、かぶり厚が小さい場合の付着性状に及ぼすひずみの影響については、ピークまでは島らの提案する式(10)によってほぼ近似できるが、ピーク以降の軟化域においては、同式で適切に評価できないことが分かった。

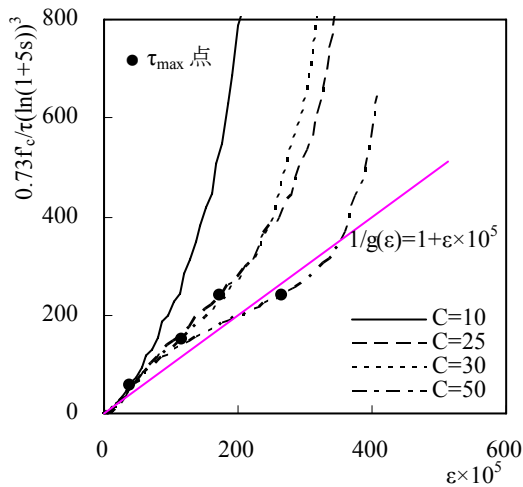


図-10 式(8)による $f(\varepsilon)$ - ε 関係(鉄筋D25)

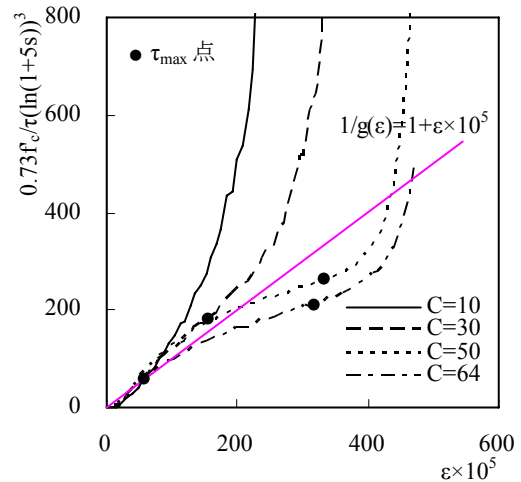


図-11 式(8)による $f(\varepsilon)$ - ε 関係(鉄筋D32)

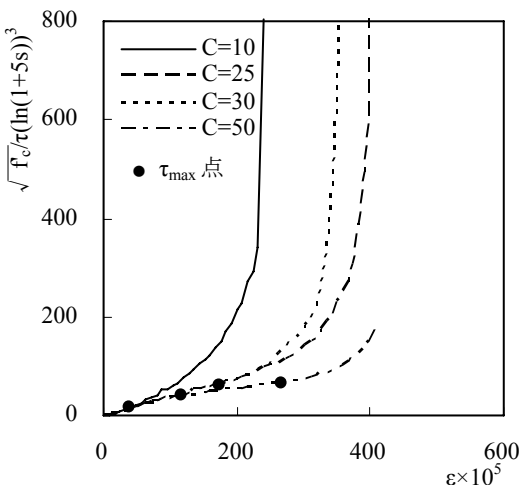


図-12 式(9)による $f(\varepsilon)$ - ε 関係(鉄筋D25)

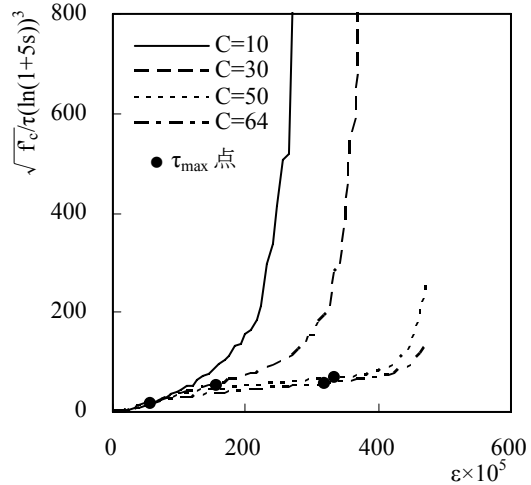


図-13 式(9)による $f(\varepsilon)$ - ε 関係(鉄筋D32)

そこで、本実験で得られた $f(\epsilon)$ - ϵ 関係の形状について検討を行ったところ、図-10～図-13 いずれの場合も、かぶり厚が 10mm と小さい供試体ではやや 2 次放物線に近い形状であるものの、かぶり厚がそれより大きいケースでは、ほぼ 3 次関数に近い形状となることが認められた。すなわち、かぶり厚が小さく軟化域を有する場合の τ - S - ϵ 関係は、付着応力が f'_c の平方根に比例すると仮定すれば式(11)のように表され、そのときのひずみの関数は式(12)のような 3 次関数の形で表すことができる。

$$\tau = \frac{\sqrt{f'_c} (\ln(1+5s))^3}{f(\epsilon)} \quad (11)$$

$$f(\epsilon) = \alpha\epsilon^3 + \beta\epsilon^2 + \gamma\epsilon \quad (12)$$

例えば、鉄筋が D25 でかぶり厚が 30mm のケースに式(9)のひずみ関数を適用すると、実験値は図-14 のような曲線で近似することができる。そして、ひずみの関数をこのような多項式で近似することによって、かぶり厚が小さい鉄筋の、ピーク以降の軟化域も含めた付着性状を評価することができるものと思われる。

次に、図-15 はかぶり厚 C が 10mm, 30mm, 50mm の場合における鉄筋径の違いによる $f(\epsilon)$ - ϵ 関係 (式(9)を適用) の変化を示したものである。いずれのかぶり厚の場合も同じひずみ量に対して D25 の $f(\epsilon)$ の値がやや大きい傾向であるが、両者の差は小さく、 $f(\epsilon)$ - ϵ 関係は同等に見える。鉄筋径の影響については、今後さらに実験データを蓄積し検討する必要がある。

4. 結論

かぶり厚、コンクリート強度、鉄筋径を変化させた RC 一軸引張供試体の両引き試験を行い、かぶり厚が小さい鉄筋の付着性状を実験的に検討した結果、本研究の範囲内において以下のような結論を得た。

- (1) コンクリート強度が τ - S 関係に及ぼす影響を検討した結果、最大付着応力 τ_{\max} はコンクリート強度 f'_c の 1/2 乗に比例する傾向が認められた。
- (2) コンクリート強度は τ - S 関係の曲線の形状に大きな影響を及ぼさない。
- (3) かぶり厚が小さい異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係を鉄筋径とコンクリート強度の影響を考慮して修正した。そのとき、ひずみの影響を表す関数は 3 次関数となり、かぶり厚が大きくなるに従ってある一定の直線に近づくことを示した。
- (4) 付着応力-すべり-ひずみ関係をより一般化するためには、ひずみの影響を表す関数の中に、かぶり厚の影響を考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 島 弘, 周 礼良, 岡村 甫: マッシュなコンクリ

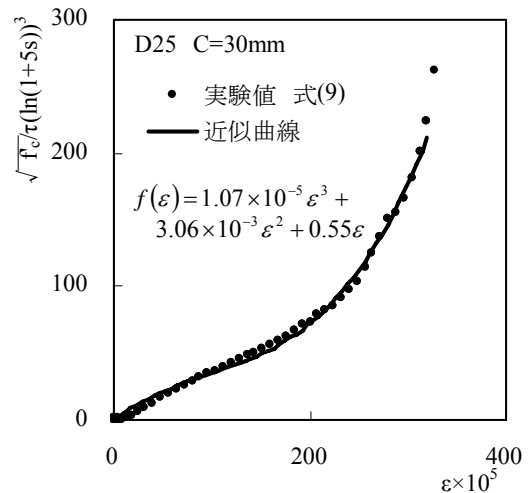


図-14 $f(\epsilon)$ - ϵ 関係の近似曲線

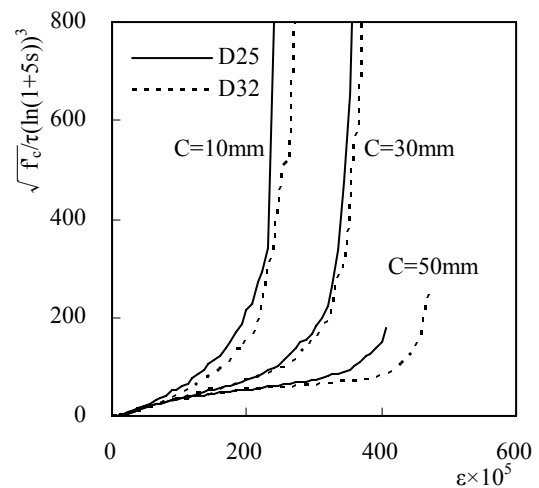


図-15 鉄筋径が異なるときの $f(\epsilon)$ - ϵ 関係

ートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり関係, 土木学会論文集, 第 378/V-6 号, pp.165-174, 1987.2

- 2) 松本 隆明・檜貝 勇・斉藤 成彦: かぶり厚が異形鉄筋の付着性状に及ぼす影響に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.823-828, 2004.6
- 3) 山尾 芳秀, 周 礼良, 二羽 淳一郎: 付着応力-すべり関係に関する実験的研究, 土木学会論文集, 343 号, pp.219-228, 1984.3
- 4) 壹岐 直之, 清宮 理, 山田 昌郎: 付着応力-すべり関係に影響を及ぼす要因の実験的研究, 土木学会論文集, 第 550/V-33 号, pp.73-83, 1996.11
- 5) 寄特 隆宏・檜貝 勇・斉藤 成彦: 異形鉄筋の付着応力-すべり関係に及ぼすかぶり厚と鉄筋直径の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.757-762, 2005.6
- 6) ACI: Building Code Requirements for Reinforced Concrete, ACI (318-77), 1992